

四川冕宁-德昌稀土成矿带铜锌、铜锡合金矿物的发现及成因意义*

谢玉玲** 侯增谦 徐九华 袁忠信 白 鸽 李小渝

(北京科技大学土木与环境工程学院, 北京 100083; 中国地质科学院矿产资源研究所 109 地质队, 北京 100037; 国土资源部四川地勘局, 成都 610100)

摘要 对扬子地台西缘喜马拉雅期稀土成矿带-四川冕宁-德昌稀土成矿带中两个大型稀土矿床, 牦牛坪稀土矿床和大陆槽稀土矿床矿石矿物组成进行详细研究. 通过矿物的反光镜下特征、扫描电子显微镜/能谱分析(SEM/EDS)和电子探针分析(EPMA), 发现了铜锌矿、含锡自然铜和自然锡三种含铜合金矿物, 这是国内首次在稀土矿床中发现铜锌合金矿物. 铜锌矿、含锡自然铜均属自然界罕见的矿物种类, 其生成条件独特, 因此该合金矿物的发现具有重要的理论意义. 通过对铜锌矿、自然锡的产状及与国内已发现自然金属矿物的成因矿物学研究对比, 认为冕宁-德昌稀土成矿带的形成与喜马拉雅期深源(幔源)岩浆作用有关.

关键词 冕宁-德昌稀土成矿带 含铜合金矿物 电子探针 成因意义 深源岩浆活动

四川冕宁-德昌稀土成矿带是中国重要的稀土成矿带, 前人对区内与成矿关系密切的碳酸岩、正长岩的岩石学、岩石化学、稀土和微量元素地球化学等进行了大量的工作^[1-11], 取得了丰富的资料. 其中的牦牛坪稀土矿床系近年来发现的、仅次于我国内蒙古白云鄂博和美国加州芒特帕斯(Mountain Pass)稀土矿床的世界第三大稀土矿床. 该矿床类型独特, 其矿石易采易选, 而且含有多种伴生有用组分, 具有重要的理论和经济意义. 近年来不少学者对该矿床进行了工

作, 已积累了一定的矿床地质、岩石化学、同位素地球化学、流体包裹体等方面的资料^[1,2,7-15]. 但对带内其他稀土矿床研究尚不深入, 对稀土矿床的成因、成矿机制等方面尚存在一些认识上的分歧. 前人曾对牦牛坪、大陆槽两稀土矿床的矿石矿物组成进行过较详细的工作^{[2,1]2)}, 但对矿石中的铜锌矿、含锡自然铜和含铜自然锡尚未见报道. 笔者通过矿相学、扫描电子显微镜/能谱分析(SEM/EDS)和电子探针分析(EPMA)在四川冕宁牦牛坪稀土矿床、德昌大陆槽稀

2004-08-26 收稿, 2005-04-11 收修改稿

* 科学技术部“973”项目“印度-亚洲大陆主碰撞带成矿作用”(批准号: 2002-CB-412600)综合课题资助

** E-mail: yulingxie@263.net

1) 中国地质大学(武汉), 四川省德昌县 DL 稀土矿床成矿条件研究. 1998

2) 中国地质矿产部四川地勘局 109 地质队. 四川省德昌县大陆槽稀土矿床稀土元素的赋存状态及综合利用研究报告. 1997

土矿床主要矿石类型中鉴定出铜锌矿、含锡自然铜和自然锡三种天然含铜合金矿物。铜锌矿、含锡自然铜为自然界罕见的矿物种类，特别是铜锌矿。含铜合金矿物的发现对研究稀土矿床成因和成矿的物理化学条件具有重要意义，含铜合金矿物本身也是重要的铜、锌、锡矿石矿物。

1 冕宁-德昌稀土成矿带地质概况

四川冕宁-德昌稀土成矿带(攀西稀土成矿带)，北起四川省冕宁县经西昌到德昌县大陆乡，长 150 km，宽 10 km。矿带呈北北东向展布，带内已发现稀土矿床(点)五个，由北向南分别为牦牛坪、木洛、麦地、里庄、大陆槽稀土矿床¹⁾，其中以牦牛坪和大陆槽规模较大，达大型规模，其余为小型或矿点。

该稀土成矿带位于扬子地台之康滇台隆西缘攀西裂谷带中北段，区内大量出露侵入或喷出的富碱质超镁铁质岩、基性岩和中酸性岩。裂谷带内的富稀土矿化岩体常呈超浅成小型侵入体产出，主要分布在安宁河断裂以西前震旦系古陆与西部海相中生代地层发育区之间的过渡地带。从北向南较知名的富含稀土的小侵入体有：冕宁牦牛坪英碱正长岩、木落碱性花岗岩、里庄英碱正长岩、西昌太和碱性花岗岩及英碱正长岩、德昌茨达碱性花岗岩、德昌大陆槽英碱正长岩等²⁾。牦牛坪稀土矿体主要产于英碱正长岩中，少量产于流纹岩中，其矿石中主要稀土矿物为氟碳铈矿，其次为氟碳钙铈矿和方铈石；脉石矿物有石英、方解石、萤石、重晶石等，还含有少量金属硫化

物和金属氧化物。矿石类型多样，有以方解石为主的块状斑杂状稀土矿石；以萤石、重晶石为主的疏松状稀土矿石；细网脉状矿石和混合矿石²⁾。大陆槽稀土矿床矿体呈大的透镜状、细脉状和网脉状，主矿体I号矿体由富含萤石、重晶石-天青石、稀土矿物的角砾岩组成，主要稀土矿物为氟碳铈矿，脉石矿物有萤石、天青石-重晶石系列、方解石，另含少量的硫化物(方铅矿、黄铁矿、黄铜矿)和金属氧化物(赤铁矿、磁铁矿、钛铁矿、铁锰氧化物)。

2 含铜合金矿物的产状、镜下特征和成分分析

本次通过光学显微镜、扫描电子显微镜/能谱分析(SEM/EDS)、电子探针分析(EPMA)，在牦牛坪稀土矿床和大陆槽稀土矿床主要矿石类型中发现铜锌矿、含锡自然铜和自然锡三种含铜合金矿物。扫描电子显微镜/能谱分析在北京科技大学新金属材料国家重点实验室进行，扫描电子显微镜型号：剑桥 S250-MK2，电子显微镜分辨率 6 nm；加速电压：30 kV；最大放大倍数：30 万倍。能谱仪型号LINK860，工作电压：1~30 kV；电流最小束斑：5 nm；分析直径：1~10 μm ；11 号元素(Na)以后，测定极限为 0.1%~0.3%。电子探针分析在中国地质科学院电子探针室进行，仪器型号：日本JEOL公司JXA8800-R电子探针仪；电流 $2 \times 10^{-8} \text{ A}$ ；加速电压 20 kV。镜下观察发现，这些含铜合金矿物多呈 5~140 μm 的不规则粒状分布于具角砾状构造矿石的角砾胶结物中(图 1)，与重晶石(天青

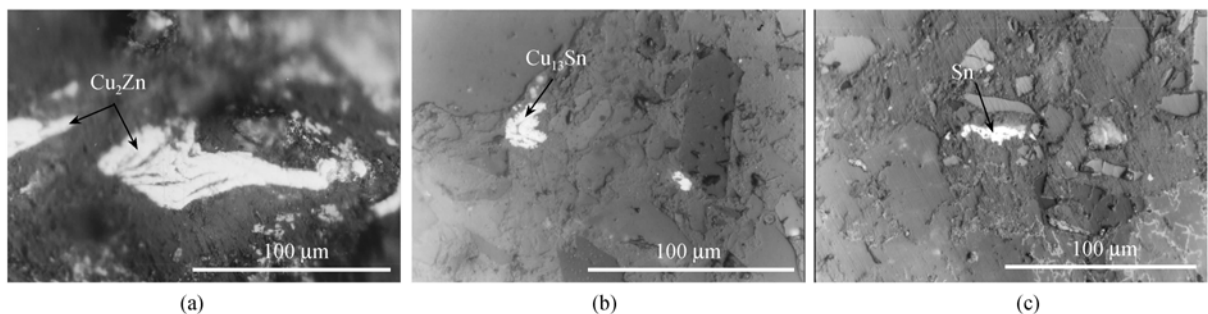


图1 铜锌矿、含锡自然铜和自然锡的显微镜下照片
(a)铜锌矿(样号 mnp-37); (b)含锡自然铜(样号 mnp-33); (c)自然锡(样号 dl-04)

1) 同 572 页脚注 2)

石)、萤石、氟碳铈矿、磁铁矿和硫化物伴生,有些氧化带矿石中与褐铁矿伴生。

铜锌矿: 反光显微镜下为金黄色, I 级反射率, 反光镜下与自然金十分相似, 表面常见有沟状凹痕和划痕, 不规则粒状, 粒径 4~140 μm , (图 1(a), 2(a)), 在牦牛坪和大陆槽稀土矿床矿石中均有发现. 牦牛坪稀土矿床中铜锌矿产于粗晶自形石英微裂隙, 裂隙中被含石英角砾的重晶石脉充填. 脉中角砾状构造明显, 角砾成分主要为石英, 胶结物主要为多孔状重晶石. 由于多孔重晶石较软, 在制样过程中常被磨蚀而不易观察. 除重晶石外还可见氟碳铈矿、磁铁矿、萤石、硫化物与之伴生. 大陆槽稀土矿床的铜锌矿发现于角砾状矿石的胶结物中, 伴生矿物与牦牛坪相似. 能谱分析显示(图 3(a)), 铜锌矿主要组成元素有 Cu, Zn 和 Fe, 后经电子探针分析(表 1), 表明其含 Cu 的质量分数(下同)为 67.06%~67.37%, Zn 的质量分数为 30.41%~31.11%, 另含少量 Fe 的质量分数为 (0.68%~0.91%), 简化化学式为 Cu_2Zn , 位于铜锌合金

相图中的 α 相, 与西藏玉龙、马拉松多斑岩铜矿^[16]、四川若尔盖斑岩铜矿床^[17]、新疆三岔口铜矿床含矿岩体中^[18]的铜锌合金矿物和喷气沉积钴矿中的铜锌合金矿物^[19]成分十分相似, 表明其确为自然界中稳定的矿物相。

含锡自然铜: 反光显微镜下呈金黄色, 与铜锌矿相似, 但颜色略深, 不规则粒状, 粒径 <5~30 μm (图 1(b), 2(b)), 产状及伴生矿物与铜锌矿相似, 在牦牛坪和大陆槽稀土矿床均有发现. 能谱分析显示(图 3(b))主要组成元素为 Cu 和 Sn, 后经电子探针分析(表 1), 表明其含 Cu 82.79%~83.80%, Sn 10.82%~11.57%, Zn 1.97%~2.82%, 近似化学式为: Cu_{13}Sn , 属含锡自然铜, 与广东长坑发现的含锡自然铜^[20]和东昆仑喷气沉积钴矿床中的含锡自然铜^[19]成分相似。

自然锡: 反光镜下呈白色微带黄色调, 不规则粒状, 粒径 30 μm (图 1(c), 2(c)), 产状与铜锌矿和含锡自然铜相同, 目前只发现于大陆槽稀土矿床, 牦牛坪稀土矿床尚未发现. 伴生矿物有重晶石、磁铁矿、天

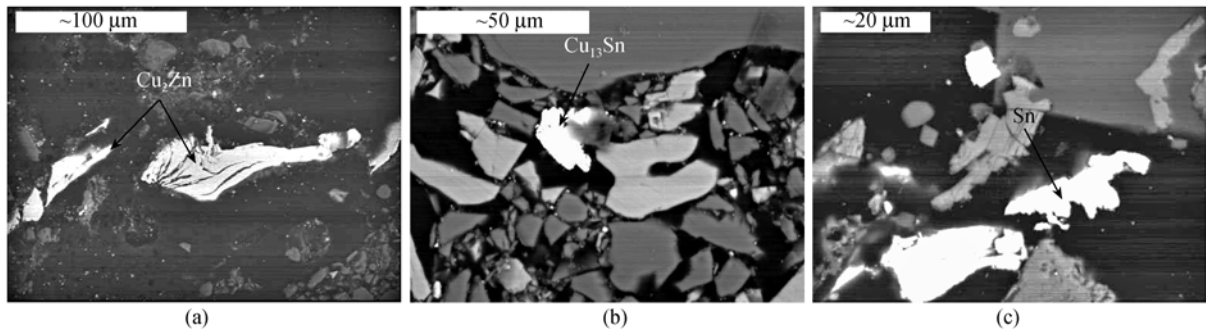


图 2 铜锌矿、含锡自然铜和自然锡背散射电子图像

(a) 铜锌矿(样号 mnp-37); (b) 含锡自然铜(样号 mnp-33); (c) 自然锡(样号 dl-04)

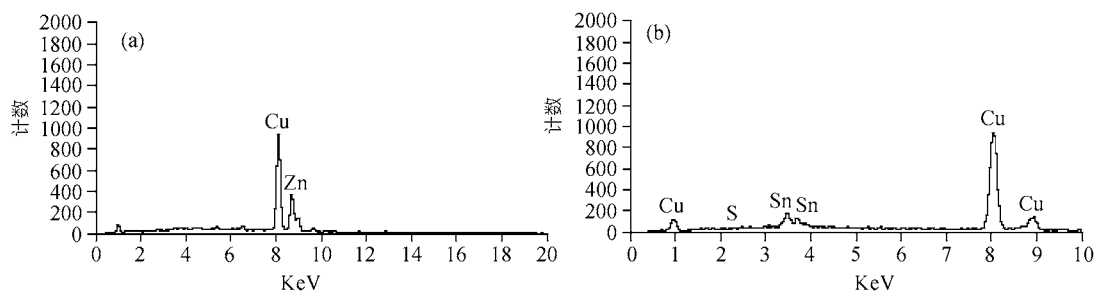


图 3 铜锌矿及含锡自然铜的能谱图

(a) 铜锌矿(样号 mnp-37); (b) 含锡自然铜(样号 mnp-33)

表1 含铜合金矿物的电子探针分析结果(wt%^{a)})

样号	Mg	Al	Si	P	K	Ca	Ti	Cr	Mn	Fe	Ni	Cu	Zn	Sn	总计	简化化学式
mnp-33-2	0.12	0.00	0.20	0.00	0.00	0.01	0.06	0.01	0.04	0.32	0.05	83.80	2.67	11.57	98.85	Cu ₁₃ Sn
mnp-33-3	0.05	0.00	0.24	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.03	2.22	0.05	82.79	2.82	10.82	99.02	Cu ₁₃ Sn
mnp-37-1	0.15	0.00	0.15	0.00	0.00	0.04	0.00	0.00	0.00	0.68	0.08	67.33	31.03	0.12	99.58	Cu ₂ Zn
mnp-37-2	0.26	0.00	0.12	0.02	0.01	0.00	0.02	0.00	0.01	0.86	0.03	67.37	30.41	0.17	99.28	Cu ₂ Zn
dl-08-1	0.00	0.00	0.13	0.00	0.00	0.01	0.00	0.02	0.05	0.12	0.57	84.56	1.97	11.47	98.90	Cu ₁₃ Sn
dl-04-1	0.08	0.00	0.26	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.06	0.39	0.16	1.01	0.09	97.05	99.11	Sn
dl-01-1	0.18	0.00	0.08	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.03	0.91	0.10	67.06	31.11	0.09	99.56	Cu ₂ Zn

a) 中国地质科学院电子探针室测定, 仪器型号JAX8800, 电流 2×10^{-8} A; 加速电压 20 kV

青石、硫化物等。电子探针分析(表1)显示其主要组成元素为锡(97.05%), 并含少量铜(1.01%), 简化化学式为 Sn。自然锡在自然界较普遍, 但由于锡和铜不易形成类质同象, 所以自然锡中一般含铜较低(<1%), 大陆槽稀土矿床发现的自然锡含铜相对较高。

3 天然铜合金矿物研究概述

自然铜在自然界普遍存在, 而天然铜锌合金矿物在自然界并不多见。铜锌合金矿物最初发现于月岩(Apollo-11)样品中^[21], 随后在陨石和多种地质体中陆续发现了不同类型的天然铜锌合金矿物。目前在已报导的铜锌合金矿物有: 安徽亳县陨石中的张衡矿(Cu₃Zn)^[22]; 四川丹巴县铜镍硫化物矿床中的丹巴矿(CuZn₂)^[23]; 四川盐源西范坪斑岩铜矿中的铜锌合金矿物(Cu₆₋₇Zn₄)^[24]; 四川若尔盖金矿床铜锌合金矿物(Cu₂Zn)^[17]; 西藏玉龙斑岩铜矿床和马拉松多斑岩铜矿床中铜锌合金矿物(Cu₂Zn)^[16]; 新疆三岔口铜矿床含矿岩体石英闪长岩中铜锌合金矿物(Cu₂Zn)^[18]; 新疆富蕴县喀拉通克铜镍硫化物矿床矿化辉长辉绿岩中铜锌合金矿物(Cu₃Zn)^[25]; 东昆仑喷气沉积钴矿床中的铜锌合金矿物(Cu₂Zn)^[19]。已发现的天然铜锌合金矿物, 除丹巴矿属铜锌合金中的 γ 相, 张衡矿属 β 相外, 其余均属 α 相。且除丹巴矿、张衡矿已正式命名外, 其他铜锌合金矿物尚无通用的矿物学名称。不同的文献中对近似化学成分的铜锌合金矿物称谓不同, 如李本海等^[25]称Cu₃Zn为锌铜矿; 郎智君^[18]称Cu₂Zn为锌铜矿; 帅德权等^[16]称Cu₂Zn为铜锌矿; Xiao等^[26]称Cu₆₋₇Zn₄为锌铜矿; 罗梅等^[17]称Cu₂Zn为铜锌矿; 张德权等^[19]称Cu₂Zn为含锌自然铜; 孙燕等^[24,26,27]将Cu₂Zn, Cu₃Zn, Cu₆₋₇Zn₄统称为锌铜矿,

其英文译名也各不相同。由此可见对铜锌合金矿物的命名亟待规范。目前, 国外关于铜锌合金矿物的详细研究也少见报道。Distler等^[28]在俄罗斯Sukhoi Log 贵金属矿床中发现了铜锌合金矿物, 但未对其进行详细的描述, 该金矿床为赋存于黑色页岩中的石英脉型金矿。目前, 尚未见在稀土矿床中有铜锌合金矿物的报道。

自然铜和自然锡是自然界较为普遍的自然金属矿物, 但含锡自然铜和含铜自然锡较少见。铜锡两元素不相邻, 一般不易形成类质同象。目前已报导的铜锡合金矿物有, 王登红^[20]曾报道了广东长坑-富湾贵金属-多金属矿田火山凝灰岩的残留体中发现含锡自然铜; 张德权等^[19]在东昆仑喷气沉积钴矿中也发现了含锡自然铜, 与冕宁-德昌稀土成矿带中发现的含锡自然铜成分相近, 铜锌、铜锡合金矿物形成的物理化学条件值得进一步研究。

4 含铜合金矿物发现的成因意义讨论

从已发现的铜锌合金矿物产状上看, 除月岩和陨石中外, 其他多产于板块构造缝合带及附近, 如西藏玉龙斑岩铜矿和马拉松多斑岩铜矿位于印度-亚洲板块主碰撞带之玉龙喜马拉雅成矿带; 新疆富蕴县喀拉通克铜镍硫化物矿床产于西伯利亚板块与哈萨克斯坦-准噶尔板块衔接部位的北准噶尔褶皱带^[29]; 新疆三岔口铜矿床产于塔里木板块与哈萨克斯坦-准噶尔板块接合处^[30]; 四川若尔盖金矿产于扬子地台北缘; 丹巴矿产于扬子地台西缘四川丹巴县岩席状超基性岩体内的含铂铜镍硫化物矿床^[23]; 冕宁德昌稀土成矿带位于扬子地台西缘, 与印度-亚洲大陆碰撞带接合处扬子地台一侧。上述资料中提及的铜锌

合金矿物虽然各自相对应的成矿类型、成矿时代不同,但大地构造背景具有相似之处,均与相对应的板块俯冲和板块碰撞作用引起的深源岩浆活动有关,产于基性、超基性岩或斑岩铜矿床或与深源岩浆活动有关的各类岩石、矿石中。

自然锡、自然铜在自然界发现较普遍。自然锡最早发现于砂矿、铀矿、含铜砂岩和火山气成物中。近年来在蛇绿岩地幔^[31]、金伯利岩^[32-34]、基性超基性岩中也有发现,但一般含铜较低(<1%)。王登红^[20]在广东长坑-富湾贵金属-多金属矿田火山凝灰岩的残留体中发现含锡自然铜;张德权等^[19]在东昆仑喷气沉积钴矿中也发现了含锡自然铜和自然锡。近年来对蛇绿岩地幔中的自然元素矿物的报道越来越多,如远东地区Koryak高原蛇绿岩的超基性岩和铬铁矿内发现多种自然金属矿物,包括自然铁、自然铜、自然铬、自然铝、自然锡、自然铅、自然镍、自然锌、自然硅、自然铍和自然碲等;乌拉尔地区蛇绿岩中发现自然金、自然铜、自然钡、自然银、自然铁、自然铬、自然钨和自然铀等;哈萨克斯坦肯皮尔赛(Kompirsai)蛇绿岩铬铁矿中也找到铂族元素合金和几种贱金属自然元素矿物^[31]。地幔捕虏体中发现了金铂合金矿物^[35]。

蛇绿岩地幔、地幔柱玄武岩(峨眉山玄武岩)中、地幔捕虏体中大量自然金属矿物的发现表明,地幔中富含自然金属矿物及金属互化物矿物,特别是一些自然条件下罕见的自然金属矿物,可能是地幔专属性矿物。从已发现的铜锌合金矿物的产状也可看出,月岩和陨石与地球深部物质组成和条件相当,其余产状也均与深源(幔源)岩浆活动有关。白文吉等^[31]认为自然元素矿物形成于强还原环境,地幔深部存在的自然元素矿物可能是在成核过程中滞留在地幔中的成核物质,被地幔柱带到浅部。前人通过实验研究,认为铜和锌在元素周期表中居同一周期中,两元素系相邻元素,原子量和原子半径相近,这些决定了铜和锌相似的化学性质,两种元素易形成合金,但由于铜和锌的亲硫性,易形成硫化物,同时铜和锌也亲氧,可形成铜和锌的氧化物,因此在地质体中要形成铜和锌的天然合金必定是一个局部缺氧缺硫的环境,并有较高熔融温度和强还原环境^[17],但冕宁-德昌稀

土成矿带与铜锌合金矿物共生和伴生大量硫酸盐矿物(重晶石、天青石等),表明其形成环境并不缺硫,可能是由于深源物质快速上升过程中自然金属未来得及与硫、氧等结合而以自然金属及金属互化物的形式沉淀下来。牦牛坪稀土矿床和大陆槽稀土矿床中的铜合金矿物均赋存于具角砾状构造的角砾胶物中,且胶结物以多孔状重晶石为特征,这些多孔状重晶石(天青石)具骨晶状结构,反映了熔(流)体快速结晶和富含挥发分的特点,结合火山气成物中发现的自然锡、凝灰岩中的含锡自然铜和喷气沉积钴矿中发现的与冕宁-德昌稀土矿床相似的自然金属矿物组合,笔者认为,冕宁-德昌稀土矿带的形成与喜山期幔源岩浆活动有关,是深(幔)源岩浆快速上涌的表现,与稀土成矿关系密切的碳酸岩的Pb, Sr, Nd同位素组成也显示出与EMI地幔源区基本一致的特征,表明是在造山过程的强挤压作用下地幔物质上涌造成^[4]。流体包裹体研究结果也支持成矿流体或成矿物质来自幔源的观点^[6,11,15]。

致谢 在电子探针分析和扫描电子显微镜/能谱分析中得到中国地质科学院电子探针室周剑雄教授、陈振宇同志、北京科技大学新金属材料国家重点实验室何建平高级工程师和中国地质大学电子探针室尹京武副教授的热情帮助,在此一并致谢。

参 考 文 献

- 1 袁忠信,施泽民. 四川冕宁牦牛坪碱性花岗岩锆石铀-铅同位素年龄及其地质意义. 矿床地质, 1993, 12(2): 189-192
- 2 袁忠信,施泽民,白 鸽,等. 四川冕宁牦牛坪稀土矿床. 北京:地质出版社, 1995. 1~150
- 3 牛贺才,林传仙. 四川冕宁牦牛坪稀土矿床脉石矿物的微量和稀土元素地球化学特征. 地球化学, 1995, 24(3): 287-293
- 4 牛贺才,林传仙. 萤石中流体-熔融包裹体研究. 地质论评, 1995, 41(1): 28-33
- 5 牛贺才,陈繁荣,林茂青. 岩浆成因重晶石、萤石的稀土元素地球化学特征. 矿物学报, 1996, 16(4): 382-388
- 6 牛贺才,单 强,陈小明,等. 攀西裂谷带轻稀土矿床与地幔过程关系. 中国科学, D辑, 2002, 32(Supp): 33-40 [摘要] [PDF]
- 7 阳正熙, Anthony E, Williams-Jones, 等. 四川冕宁牦牛坪稀土矿床地质特征. 矿物岩石, 2000, 20(2): 28-34
- 8 阳正熙, Anthony E, Williams-Jones, 等. 四川牦牛坪稀土矿床矿物流体包裹体研究. 矿物岩石, 2001, 21(2): 26-33
- 9 许 成,黄智龙,漆 亮,等. 四川牦牛坪稀土矿床成矿流体来源与演化初探-萤石稀土元素地球化学的证据. 地质与勘探, 2001, 37(5): 24-28

- 10 许成, 黄智龙, 刘丛强, 等. 四川牦牛坪稀土矿床碳酸岩地球化学. 中国科学, D辑, 2002, (8): 635~646[摘要][PDF]
- 11 许成, 黄智龙, 刘丛强, 等. 四川牦牛坪稀土矿床萤石 Sr、Nd 同位素对地幔成矿流体的指示意义. 地球科学-中国地质大学学报, 2003, 28(1): 41~46
- 12 牛贺才, 单强, 林茂青. 四川冕宁稀土矿床包裹体研究. 地球化学, 1996, 25(6): 559~567
- 13 徐九华, 谢玉玲, 李建平, 等. 四川牦牛坪稀土矿床流体包裹体中含锶和轻稀土的子矿物. 自然科学进展, 2001, 11(5): 543~547
- 14 王登红, 杨建民, 闫升好, 等. 四川牦牛坪碳酸岩的同位素地球化学及其成矿动力学. 成都理工学院学报, 2002, 29(5): 539~544
- 15 刘丛强, 黄智龙, 许成, 等. 地幔流体及其成矿作用——以四川冕宁稀土矿床为例, 北京: 地质出版社, 2004. 99~216
- 16 帅德权, 张如柏, 罗梅, 等. 天然铜锌系列中铜锌矿物(Cu_2Zn)的研究. 矿物学报, 1998, 18(4): 509~512
- 17 罗梅, 王月文. 若尔盖巴西金矿床铜锌矿的发现及其地质意义. 矿物学报, 1999, 19(1): 20~22
- 18 郎智君, 师波, 李天德. 新疆石英闪长岩体中发现锌铜矿. 新疆地质, 1990, 8(3): 244~252
- 19 张德全, 王彦, 丰成友, 等. 驼路沟喷气沉积型钴(金)矿床的地质-地球化学. 矿床地质, 2002, 21(3): 213~222
- 20 王登红. 广东发现含锡自然铜, 岩石矿物学杂志, 1999, 18(2): 171
- 21 Agrell S O, Scoon J H, Muir I D, et al. Mineralogy and petrology of some lunar samples. Science, 1970, 167(3918)(The Moon Issue): 583~586
- 22 王奎仁. 新矿物——张衡矿, 矿物学报, 1986, 6(3): 220~223
- 23 岳书勤, 王文瑛, 刘金定, 等. 丹巴矿的研究, 科学通报, 1982, 27(22): 1382~1386
- 24 孙燕, 肖渊甫, 温春齐, 等. 四川西范坪斑岩铜矿床中锌铜矿的发现及成因意义. 矿物岩石地球化学通报, 2002, 21(4): 266~267
- 25 李本海, 薛秀娣, 易爽庭. 喀拉通克一号岩体发现锌铜矿. 地质实验室, 1989, 5(4): 239~241
- 26 Xiao Y F, Sun Y, Lu Y, et al. Zincocopperite——A new variety of zinc-copper intermetallic compounds discovered in a porphyry-copper deposit. Acta Geologica Sinica, 1998, 72(3): 308~313
- 27 孙燕, 肖渊甫, 王奖臻, 等. 我国天然锌铜金属互化物的发现和特征. 矿物岩石, 2003, 23(2): 11~14
- 28 Distler V V, Yudovskaya M A, Gennady L. Mitrofanov, et al. Geology, composition and genesis of the Sukhoi Log noble metals deposit, Russia Vsevolod Yu. Prokof'ev, Erick N. Lishnevski, Ore Geology Reviews, 2004, 24: 7~44[DOI]
- 29 冉红彦, 肖森宏. 喀拉通克含矿岩体的微量元素与成岩构造环境, 地球化学, 1994, 23(4): 392~401
- 30 李华芹, 陈富文, 路远发, 等. 东天山三岔口铜矿区矿化岩体 SHRIMP U-Pb 年代学及锶同位素地球化学特征研究. 地球学报, 2004, 25(2): 191~195
- 31 白文吉, 杨经绥, 方青松, 等. 西藏蛇绿岩地幔中的主要自然金属矿物. 地学前缘, 2004, 11(1): 179~187
- 32 赵磊, 路凤香, 郑建平, 等. 金刚石中首次发现自然银和含银铁-金合金包裹体. 科学通报, 1995, 40(12): 1114~1115
- 33 路凤香. 深部地幔及深部流体. 地学前缘, 1996, 3(3-4): 181~186
- 34 郑建平, 路凤香, 赵磊, 等. 华北地台古生代金伯利岩(包括金刚石)中流体及其在地幔演化中的作用. 大地构造与成矿学, 1996, 20(2): 105~118
- 35 徐九华, 谢玉玲, 陈绪松, 等. 雷琼地幔岩中的硫化物及 Au-Pt 合金的发现. 地球科学-中国地质大学学报, 2002, 27(supp): 280~286